

УДК 550.34.01

*Мазур Владимир Геннадьевич,
к.т.н., доцент каф. ПЭ и ИИТ
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: systems-ntfs@mail.ru*

*Пудалов Алексей Дмитриевич,
к.т.н., доцент каф. ПЭ и ИИТ,
ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет»,
e-mail: puddim@rambler.ru*

**ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ СТУДЕНТАМИ НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ
«ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА»**

Mazur V.G., Pudalov A.D.

**FEATURES OF THE APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELING OF
ELECTRONIC DEVICES BY STUDENTS OF THE DIRECTION OF PREPARATION
«ELECTRONICS AND NANOELECTRONICS»**

Аннотация. Рассмотрено математическое моделирование электронных устройств как инструмент для понимания работы полупроводниковых устройств на примере диода.

Ключевые слова: математическое моделирование, диод, транзистор, модель.

Abstract. Mathematical modeling of electronic devices is considered as a tool for understanding the operation of semiconductor devices on the example of a diode.

Keywords: mathematical modeling, diode, transistor, model.

В настоящее время математическое моделирование стало неотъемлемой частью различных исследований, как научных, так и при выполнении лабораторных и курсовых работ в процессе обучения студентами. Это связано с простотой исследования поведения объекта при различных входных параметрах.

При выполнении лабораторных и курсовых работ студентами направления подготовки «Электроника и нанoeлектроника» часто приходится сталкиваться с выполнением задач, проектирование которых сложно, и результат часто зависит от выбора многих начальных факторов.

Любое современное электронное устройство содержит один или несколько следующих основных блоков: входной и выходной фильтры, усилитель, генератор. Более сложные устройства чаще используют такие радиоэлементы, которые работают с логическими уровнями – малые цифровые (интегральные) схемы, контроллеры, процессоры, программируемые логические интегральные схемы. Всё чаще сложная обработка сигнала происходит именно цифровыми устройствами, что связано с простотой реализации работы схемы, высокой надежностью, низкой стоимостью и многими другими факторами. Однако повсеместное использование контроллеров и др. цифровых устройств без ис-

пользования дискретных силовых, задающих, согласующих и различных других элементов невозможно. Расчет работы таких устройств различный. Однако принцип работы каждого отдельно взятого устройства (или элемента) с таким же по функциональным свойствам одинаковый. Законы работы таких устройств известны и описаны в литературе [1-2]. Поэтому применение математического моделирования значительно ускоряет процесс расчета, увеличивает точность анализа, а значит, его использование актуально.

Под математической моделью реального объекта обычно понимают любое математическое описание, отражающее с требуемой точностью поведение этого объекта в заданных условиях. В электронных устройствах математической моделью является математическое описание связей между токами и напряжениями, возникающими в устройстве в статическом или в динамическом режимах работы.

Математическая модель сложного компонента электронной схемы может иметь «внешние» и «внутренние» параметры и определяется его физической структурой и способом использования. Внутренними параметрами могут быть, в зависимости от целей проектирования, электрические или конструктивно-технологические параметры ком-

понента. Внутренние параметры компонентов изучаются лишь на некоторых специальных дисциплинах и для расчета схем применяются редко, поэтому в настоящей статье внутренние параметры математических моделей рассматриваться не будут.

При анализе работы устройства наиболее используемыми являются внешние параметры, в частности – первичные: токи и напряжения, а также вторичные внешние параметры, вычисляемые на основе токов и напряжений: длительности фронтов, задержек, рассеиваемые и потребляемые мощности, неравномерности частотных характеристик и др. Вторичные внешние параметры иногда называют схемными параметрами.

Изучение разновидностей математических моделей дает лучшее понимание физического процесса, происходящего как в объекте, так и в функциональном его применении. Например, физическая модель в допустимой степени отражает процессы, протекающие в полупроводниковых приборах. Применение же формальных моделей оправдано, когда физика работы элемента ясна недостаточно полно или когда требуется провести качественный анализ работы схемы в целом. Например, одна из лабораторных работ по дисциплине «Математическое моделирование электронных устройств» посвящена анализу работы диода. Одним из заданий является аппроксимация его вольтамперной характеристики (ВАХ). Например, схема замещения Эберса-Молла для диода приведена на рисунке 1.

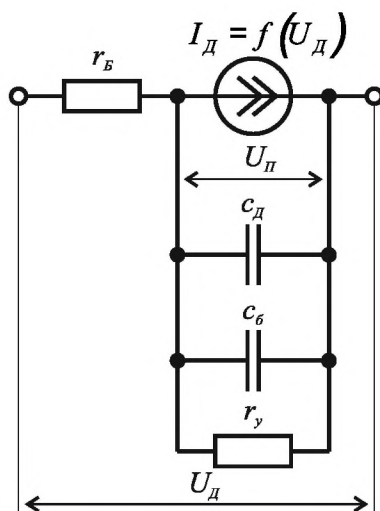


Рисунок 1 – Схема замещения Эберса-Молла

На рисунке 1 обозначено: r_B – омическое сопротивление базы диода, r_y – сопротивление утечки, c_B – барьерная емкость, c_D – диффузионная емкость, I_D – ток, протекающий через диод, U_D – напряжение р-п перехода, U_D – напряжение на диоде в момент протекания тока через диод I_D .

ВАХ диода приведена на рисунке 2

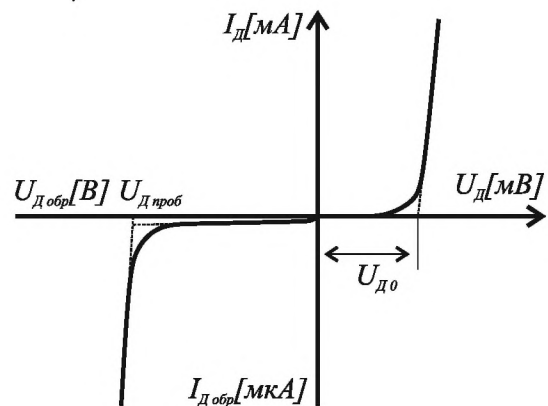


Рисунок 2 – Вольтамперная характеристика диода

На рисунке 2 обозначено: $U_{проб}$ – напряжение пробоя, U_{D0} – пороговое напряжение, $U_{Dобр}$ – обратное напряжение на диоде, $I_{Dобр}$ – ток через диод при обратном смещении.

Ток, протекающий через диод, имеет сложную функциональную зависимость и описывается следующим уравнением [3]:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{U_D - r_B I_D}{m \cdot \varphi_T}\right) - 1 \right],$$

где I_0 – тепловой ток диода;
 m – коэффициент неидеальности;
 $\varphi_T = \frac{kT}{q}$ – тепловой потенциал;
 где k – постоянная Больцмана;
 T – температура;
 q – заряд электрона.

При кусочно-линейной аппроксимации ВАХ диода является сложной экспоненциальной зависимостью – отображается четырьмя прямыми линиями, приведенными на рисунке 3.

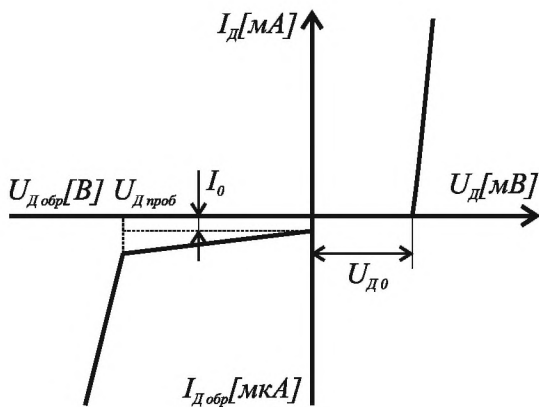


Рисунок 3 – Кусочно-линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики диода

Зависимости тока от напряжения, описывающие работу диода после кусочно-линейной аппроксимации, принимают следующий вид:

$$U_D = \begin{cases} U_{D \text{ проб}} + r_3 I_D & U_D < U_{D \text{ проб}} \\ r_2 I_D & U_{D \text{ проб}} < U_D < 0 \\ 0 & 0 < U_D < U_{D0} \\ U_{D0} + r_1 I_D & U_D > U_{D0} \end{cases},$$

где r_1, r_2, r_3 – сопротивления диода при разных режимах работы.

Понимание модели, записанной последним способом, намного проще, так как нет нелинейных зависимостей. Модель показывает работу диода как функцию одного из звеньев структурной цепи электронного устройства, что намного проще для понимания его работы. Особенно это важно при изучении таких учебных дисциплин, как «Схемотехника», «Преобразовательная техника», «Микропроцессорная техника» и др.

Более сложным прибором, принцип работы которого необходимо усвоить, является биполярный транзистор. Это один из важнейших радиоэлементов электронных схем, так как именно он является активным

прибором, позволяющим производить над сигналами различные преобразования.

В отличие от диода, у транзистора больше режимов работы: нормальный активный, инверсный активный, отсечки, насыщения. В некоторой литературе [4] выделяют еще один режим – барьерный, представляющий собой режим работы как диода, включенного последовательно с токозадающим резистором. Полная математическая модель транзистора достаточно сложна, и не подходит для изучения студентами режимов его работы. Поэтому рассмотрение упрощенных математических моделей важно для образовательного процесса.

Понимание работы биполярного транзистора позволяет понять работу других радиоэлементов, принцип работы которых очень схож, например, полевых транзисторов, IGBT-транзисторов, тиристоров и др.

Так как на основе транзистора строятся такие радиоэлементы электронных схем, как операционные усилители и логические микросхемы, то верное понимание физических процессов работы транзистора позволяет и лучше понять принцип построения, и внутреннюю работу самих радиоэлементов. Кроме того, понимание внутреннего устройства радиоэлементов позволяет не допустить ошибок при разработке, которые могут привести к преждевременному выходу из строя электронной схемы.

Таким образом, при практическом проектировании можно значительно упростить подходы при постановке задач моделирования и понимание работы электронных устройств.

Изучение дисциплины «Математическое моделирование электронных устройств» в ключе всестороннего исследования работы радиоэлементов, в том числе различных математических моделей одного и того же радиоэлемента, приводит к лучшему пониманию принципа работы электронных устройств в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника. М. : Высш. шк., 2005. – 790 с.
2. Королев Г.В. Электронные устройства автоматики – Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1991. – 256 с.
3. Методические указания по выполнению курсового проектирования по дисциплине

- лине «Математическое моделирование электронных устройств» / Мазур В.Г., Пудалов А.Д. – Ангарск: АГТА, 2013. – 38 с.
4. Лаврентьев Б.Ф. Схемотехника электронных средств. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.